

VU Research Portal

Satellite remote sensing of cloud properties in support of tropospheric trace gas retrievals

van Diedenhoven, B.

2007

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

van Diedenhoven, B. (2007). *Satellite remote sensing of cloud properties in support of tropospheric trace gas retrievals*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Samenvatting

Satellietwaarnemingen van wolkeneigenschappen voor de bepaling van sporengassen in de troposfeer

De atmosfeer is de dunne complexe schil van lucht rondom onze planeet. Het bestaat voor bijna 99,9% uit stikstof, zuurstof en argon¹. De 0,1% die overblijft bestaat uit zogeheten sporengassen zoals koolstofdioxide, ozon en stikstofdioxide. Vele van deze sporengassen spelen een essentiële rol in het klimaat en de atmosferische chemie en zijn daarmee zeer belangrijk voor de leefbaarheid van de aarde. Door menselijke activiteiten zoals landbouw en de verbranding van fossiele brandstoffen is de samenstelling van de lucht de laatste eeuw sterk veranderd. Dit is vooral het geval in de troposfeer -de laag in de atmosfeer die vanaf de grond tot ongeveer 10 km hoog reikt. Door de luchtvervuiling verandert de delicate chemie in de troposfeer. Verder leidt deze uitstoot tot een verslechterde luchtkwaliteit, vooral in steden. Een andere grote zorg voor onze planeet is de toename van zogeheten broeikasgassen zoals koolstofdioxide, methaan en troposferisch ozon. Deze gassen absorberen de warmtestraling die door het aardoppervlak wordt uitgezonden en zenden een deel daarvan vervolgens weer terug naar beneden, wat resulteert in een netto opwarming van de lucht dichtbij het oppervlak. Dit wordt het broeikaseffect genoemd². Broeikasgassen komen van nature voor in de atmosfeer en zijn cruciaal voor de leefbaarheid van de aarde. Een toename van broeikasgassen leidt echter tot een versterkt broeikaseffect en dus tot hogere temperaturen, mogelijk met desastreuze gevolgen, zoals bijvoorbeeld geconcludeerd door het *International Panel on Climate Change (IPCC, 2007a)*. Het is daarom van groot belang om de veranderingen in de concentraties van de stoffen in de

¹voor droge lucht. Vochtige lucht kan tot 4% waterdamp bevatten

²Verwarrend genoeg is dit niet hetzelfde effect dat een broeikas verwarmt. Daar wordt de convectie van warme lucht tegengehouden door het glas.

atmosfeer mondiaal in de gaten te houden en te bestuderen.

Omdat satellieten dagelijks een groot deel van de aarde of zelfs de gehele aarde waarnemen kunnen ze een belangrijke bijdrage leveren aan het onderzoek naar de atmosfeer. De twee satellietinstrumenten waar dit proefschrift zich voornamelijk op richt zijn de *Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography* (SCIAMACHY), gelanceerd in 2002, en zijn voorganger de *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME), gelanceerd in 1995. Beide instrumenten werken vandaag de dag nog steeds. Een verbeterde versie van GOME, GOME-2, is gelanceerd in 2006 en zal worden gevolgd door 2 identieke instrumenten. Een instrument dat vergelijkbaar is met GOME en SCIAMACHY is het Nederlands-Finse *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) gelanceerd in 2004. Deze satellietinstrumenten meten licht van verschillende golflengtes dat is gereflecteerd door de aarde en de atmosfeer³. Deze metingen bevatten zogeheten absorptiebanden waar bepaalde sporengassen licht van voor hen karakteristieke golflengtes hebben geabsorbeerd. De relatieve hoeveelheid licht die is geabsorbeerd bij een bepaalde golflengte stelt ons in staat de aanwezige hoeveelheid van het absorberende sporengas te herleiden. Hiervoor wordt in een eerste stap de satellietmeting voor een gegeven sporengasconcentratie zo goed mogelijk gesimuleerd en vergeleken met de echte meting. Als deze onvoldoende overeenkomen wordt de hoeveelheid sporengas in de simulatie iets aangepast en worden de twee spectra weer met elkaar vergeleken. Dit proces herhaalt zich totdat de simulatie overeenkomt met de echte meting. Er kan dan worden aangenomen dat de sporengasconcentratie in de simulatie overeen komt met de echte sporengasconcentratie. Op deze manier kan de echte sporengasconcentratie uit de meting bepaald worden. Om de satellietmeting te simuleren moet de verstrooiing en absorptie van licht door de atmosfeer worden gemodeleerd. Dit wordt gedaan aan de hand van een zogeheten stralingstransportmodel.

Helaas worden satellietwaarnemingen van de troposfeer bemoeilijkt door de aanwezigheid van wolken. Bijna 70% van de aarde is gemiddeld genomen bewolkt⁴. Omdat satellietinstrumenten een beperkte ruimtelijke resolutie hebben van vaak enkele honderden of duizenden vierkante kilometers, wordt meer dan 90% van hun waarnemingen beïnvloed door wolken. Om toch de troposferische samenstelling uit deze metingen zo nauwkeurig

³Zie figuur 1.3 op pagina 9 voor een voorbeeld

⁴Zie figuur 1.2 op pagina 5 voor de mondiale verdeling van de gemiddelde wolkenbedekking

mogelijk te bepalen moeten de wolken zo goed mogelijk gekarakteriseerd worden in het stralingstransportmodel. Hiervoor moeten de belangrijkste wolkeneigenschappen voor elke meting bekend zijn. Voor GOME en SCIAMACHY zijn drie wolkeneigenschappen zeer belangrijk: Ten eerste moet de optische dikte van de wolk bekend zijn. De optische dikte is een maat voor de hoeveelheid licht die door de wolk dringt en de hoeveelheid die gereflecteerd wordt door de wolk. Ten tweede moet, omdat GOME en SCIAMACHY een beperkte ruimtelijke resolutie hebben, per meting bepaald worden hoeveel van hun gezichtsveld bedekt wordt door wolken. Dit wordt ook wel de wolkenfractie genoemd, welke tussen 0 (onbewolkt) en 1 (geheel bewolkt) ligt. Ten derde is het nodig de wol kentophoogte te bepalen⁵. Voor de bepaling van wolkeneigenschappen worden doorgaans GOME en SCIAMACHY metingen van de sterke absorptie band van molecuulair zuurstof bij 760 nm (de zuurstof A-band) gebruikt. De diepte van de zuurstof A-band hangt direct af van de hoeveelheid waargenomen zuurstof. Omdat een wolk optisch dik is neemt het instrument weinig licht waar van onder de wolk. Hoe hoger de wolk, hoe groter het gedeelte zuurstof is dat wordt afgeschermd voor de satelliet. Hierdoor hangt de diepte van de zuurstof A-band af van de hoogte van de aanwezige wolken. Verder wordt de reflectie meting in het continuüm rondom de zuurstof A-band voornamelijk bepaald door de wolkenfractie en de wolken optische dikte⁶. Het is echter onmogelijk om naast de wol kentophoogte ook de wolkenfractie en de wolken optische dikte beide te bepalen uit de zuurstof A-band metingen. Een veelgebruikte oplossing voor dit probleem is om een wolken optische dikte aan te nemen en zogeheten effectieve wolkenfracties te bepalen uit de metingen. In dit proefschrift wordt echter aangetoond dat het gebruik van effectieve wolkenfracties in algoritmes om sporengas informatie te bepalen significante fouten op kan leveren. Daarom is het herleiden van de onafhankelijke informatie van de wol kentophoogte, de wolkenfractie en de wolken optische dikte uit de GOME en SCIAMACHY metingen het voornaamste doel van dit proefschrift.

Om te beginnen wordt in hoofdstuk 2 de kwaliteit van de GOME en SCIAMACHY metingen in de zuurstof A-band geëvalueerd. Dit wordt gedaan

⁵Zie tabel 1.1 en figuur 1.1 op pagina 4 voor typische wolkeneigenschappen voor verschillende wolken-typen

⁶Zie figuur 1.6 op pagina 14 voor de gevoeligheden van de zuurstof A-band voor de verschillende wolkeneigenschappen

door middel van het bepalen van de gronddruk uit wolkenvrije metingen. De herleide gronddrukken kunnen heel nauwkeurig gevalideerd worden, omdat gronddruk over het algemeen goed bekend is uit weersmodellen. Een validatie van de gemeten gronddruk kan dus belangrijke informatie over de kwaliteit van de metingen en het stralingstransportmodel prijsgeven. In de bepaling van de gronddruk zijn aerosolen -dat zijn kleine zwevende deeltjes in de atmosfeer zoals roet, zand en zeezout- genegeerd. Aan de hand van gesimuleerde metingen wordt aangetoond dat deze aanname in het algemeen leidt tot een onderschatting van de gronddruk. Dit komt doordat de aerosolen het licht terugverstrooien en zo het lichtpad verkorten. Boven sterk reflecterende oppervlaktes kunnen de aerosolen echter ook leiden tot een verlenging van het lichtpad en daarmee tot een overschatting van de gronddruk leiden. Deze effecten hangen sterk af van de optische dikte en de hoogteverdeling van de aerosolen. Gronddrukken herleid uit SCIAMACHY metingen komen goed overeen met die uit de UKMO meteorologische dataset als het effect van aerosolen in acht worden genomen. Er is echter wel een systematische overschatting van ongeveer 20 hPa te zien in de SCIAMACHY metingen. Een vergelijkbare overschatting is waargenomen bij de vergelijking tussen gronddrukken die herleid zijn uit SCIAMACHY metingen en die herleid zijn uit de gerelateerde GOME metingen. Er wordt aangenomen dat deze systematische afwijking veroorzaakt wordt door een kalibratiefout van de SCIAMACHY metingen. Als bij de SCIAMACHY reflectie metingen in de zuurstof A-band 0.86% van de continuümwaarde bij 756 nm wordt opgeteld, verdwijnt deze systematische afwijking.

In hoofdstuk 3 wordt een nieuw stralingstransportmodel geïntroduceerd dat zeer efficiënt het transport van straling in atmosferen met wolkenlagen kan simuleren. Bovendien simuleert dit model tegelijk ook de trillingsrichting van het licht, oftewel de polarisatie. Dergelijke berekeningen, die nodig zijn om de GOME en SCIAMACHY metingen voor bewolkte gevallen goed te kunnen interpreteren, kosten in het algemeen veel tijd. Om tijd te winnen is een nieuwe aanpak van het stralingstransportprobleem toegepast door twee bekende methodes te combineren, namelijk de Gauss-Seidel methode, die snel is in het gedeelte van de atmosfeer zonder wolken, en de doubling methode, die snel is voor stralingstransportberekeningen in wolklagen. Voor stralingstransportberekeningen bij één golflengte en een atmosfeer met één wolklaag is dit *combined doubling and Gauss-Seidel*

(CODAGS) model 3–5 keer zo snel als het veelgebruikte doubling-adding model bij een nauwkeurigheid van 0.01%. Vervolgens is het model verder geoptimaliseerd voor simulaties van metingen bij meerdere golflengtes in absorptiebanden. Hiervoor worden de reflectie en transmissie van de wolklaag slechts voor een aantal waarden van de absorptie en verstrooiings optische dikte in de wolklaag exact berekend en vervolgens voor de overige waarden bepaald door middel van interpolatie. Tevens is hiervoor een manier om automatisch de hoeveelheid interpolatiepunten en hun verdeling over de optische dikte te bepalen ontwikkeld. De snelheid en nauwkeurigheid van het resulterende CODAGS model zijn aan de hand van stralingstransportberekeningen in de zuurstof A-band en de Hartley-Huggins ozon absorptieband (295–335 nm) geanalyseerd. Met het CODAGS model kunnen SCIAMACHY metingen van deze twee banden voor een atmosfeer met één dikke wolklaag gesimuleerd worden in ongeveer 12 tot 60 seconden met een nauwkeurigheid die beter is dan 0.1%. Dit is een tijdwinst van ongeveer 2 á 3 orders van grootte. Dit stralingstransportmodel wordt gebruikt voor het onderzoek beschreven in hoofdstuk 4 en 5.

Hoofdstuk 4 beschrijft een nieuwe methode om informatie over de wolkenfractie, wolken optische dikte en wolkentophoogte te herleiden uit GOME en SCIAMACHY metingen. In deze methode wordt gebruik gemaakt van metingen van de zuurstof A-band en in het ultraviolet (UV) tussen 350 nm en 390 nm. In dit hoofdstuk wordt aangetoond dat metingen van alleen de zuurstof A-band onvoldoende zijn om genoeg informatie van wolkenfractie, wolken optische dikte en wolkentophoogte te bepalen. Als de UV-metingen worden toegevoegd is er wel voldoende informatie over deze drie wolkenparameters in de metingen aanwezig. Ook kan dan tegelijk informatie over de grondreflectie uit de metingen gehaald worden. De UV-metingen voegen informatie over wolken toe, omdat in dit golflengtegebied het licht afkomstig van het wolkenvrije gedeelte van het gezichtsveld van de satelliet gedomineerd wordt door Rayleigh verstrooiing aan luchtmoleculen, dat een zeer sterke golflengteafhankelijkheid heeft. Omdat het spectrale signatuur van de Rayleigh verstrooiing heel anders is dan die van verstrooiing aan wolkendruppels zijn de UV-metingen vooral gevoelig voor de wolkenfractie. Om de relevantie van deze aanpak te illustreren wordt aan de hand van simulaties aangetoond dat het gebruik van effectieve wolkenparameters tot een significante onderschatting kan lei-

den in de troposferische stikstofdioxideconcentratie bepaling uit GOME en SCIAMACHY metingen. Deze onderschatting kan vermeden worden als de wolkenparameters worden gebruikt die met de hier beschreven methode worden bepaald. De methode is toegepast op GOME metingen. De resulterende wolkeneigenschappen zijn vergeleken met de corresponderende waarden bepaald op dezelfde plaats en tijd door een ander satellietinstrument, namelijk de ATSR-2. Door de hoge ruimtelijke resolutie van de ATSR-2 metingen ($1 \times 1 \text{ km}^2$) zijn deze meer geschikt om met name de wolkenfractie en de wolken optische dikte uit te bepalen dan de GOME metingen. De wolkeneigenschappen bepaald door de twee instrumenten komen in het algemeen goed met elkaar overeen. De verdelingen van de verschillen tussen wolkenfracties, wolken optische diktes en de wolkentophoogtes bepaald met GOME en ATSR-2 hebben mediaan waarden en 68% betrouwbaarheidsinterval (tussen haakjes) van respectievelijk $-0.01 (\pm 0.11)$, $2.5 (\pm 7.5)$ and $-33 (\pm 111)$ hPa.

In hoofdstuk 5 worden de wolkeneigenschappen, die bepaald zijn met de methode beschreven in hoofdstuk 4, gebruikt voor het bepalen van ozon hoogteprofielen uit UV-metingen van GOME. Deze aanpak (CUVO₂ genoemd) wordt vergeleken met twee andere veel gebruikte manieren om met wolken rekening te houden in ozonprofiel bepalingen, namelijk: (1) door een effectieve grondreflectie te herleiden uit de metingen (CaA aanpak); en (2) door gebruik te maken van effectieve wolkenfracties en wolkentophoogtes onder de aanname van een wolken optische dikte van 40 (Ceff aanpak). Aan de hand van een set van gesimuleerde GOME metingen laten we zien dat de gemiddelde ozonconcentratie in de troposfeer kan worden herleid met fouten onder de 3% als de CUVO₂ aanpak wordt gebruikt, terwijl deze wordt onderschat tot 85% als de CaA aanpak wordt gebruikt en tot 18% wordt overschat als de Ceff aanpak wordt gebruikt. De grootste fouten zijn in het algemeen dicht bij de grond te vinden. De onderschatting door de CaA aanpak wordt veroorzaakt doordat de gedeeltelijke wolkenbedekking en de hoogte van de wolken in deze benadering worden genegeerd. De Ceff aanpak veroorzaakt overschattingen omdat de effectieve wolkenfractie van golflengte afhangt, zoals in hoofdstuk 4 is aangetoond. Deze golflengteafhankelijkheid geldt met name voor de UV-metingen die voor de ozonprofiel bepalingen gebruikt worden. Daardoor is er geen eenduidige waarde voor de effectieve wolkenfractie te bepalen voor deze metingen. Vervolgens zijn

ozon hoogteprofielen uit GOME metingen herleid met de CUVO₂, CaA en CeFF methodes. De resultaten zijn gevalideerd met metingen die gedaan zijn met behulp van ballonsondes op dezelfde dag en ongeveer dezelfde plek. De gemiddelde verschillen tussen de ozonconcentraties in de troposfeer gemeten door de sondes, en die herleid uit de GOME metingen met de CUVO₂, CaA en CeFF aanpakken zijn respectievelijk 15%, -60%, en 27%. Er is aangetoond dat de onverwachte overschatting van de ozonconcentratie door de CUVO₂ aanpak veroorzaakt wordt door een derde van de gevallen waar ten onrechte zeer hoge wolken optische diktes ($>> 40$) voor zijn afgeleid. Met de CUVO₂ aanpak wordt in deze gevallen een grote overschatting van de ozonconcentratie in de troposfeer van 45% gevonden. De CeFF aanpak leidt tot nog grotere fouten van 60% voor deze gevallen. In hoofdstuk 4 wordt aangetoond dat de foutieve bepaling van zulke hoge optische diktes waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van horizontaal inhomogene of dubbele wolkenlagen in het gezichtsveld van GOME. De CUVO₂ en de CeFF aanpak zijn dus niet adequaat in het geval van inhomogene wolken. Voor de situaties met optische diktes tussen 5 en 40 geeft de CUVO₂ aanpak een overschatting in de gemiddelde ozonconcentratie van minder dan 7%, terwijl de CeFF aanpak een overschatting van 25% geeft, vergelijkbaar met wat in de simulaties is gevonden. Ook voor wolken optische diktes lager dan 5 geeft de CUVO₂ aanpak een lage gemiddelde fout van minder dan 4%. De CeFF aanpak leidt voor deze gevallen echter tot een kleine maar onverwachte onderschatting. Dit is mogelijk doordat voor deze lage wolken optische diktes de bepaling van de effectieve wolkenfracties zeer gevoelig is voor systematische fouten in de aangenomen grondreflectie. Voor alle methodes wordt een grote spreiding gevonden in het verschil tussen ozonconcentraties in de troposfeer, gemeten door de sondes en die bepaald zijn door GOME. Deze grote spreiding is waarschijnlijk (ten dele) te wijten aan variabiliteit van ozon binnen het grote ($960 \times 80 \text{ km}^2$) gezichtsveld van GOME, waardoor de sondemetingen niet geheel representatief zijn voor de GOME metingen.

De belangrijkste conclusies van dit proefschrift zijn:

1. Het bepalen van de gronddruk uit SCIAMACHY en GOME metingen met behulp van de zuurstof A-band kan gebruikt worden ter evaluatie

van de kalibratie van deze metingen. Een vergelijking van de gronddruk herleid uit SCIAMACHY metingen en de corresponderende waarden uit de UKMO meteorologische dataset laat een systematische overschatting van 20 hPa zien. Eenzelfde verschil is waargenomen bij een vergelijking van de gronddruk bepaald uit SCIAMACHY metingen met die bepaald uit GOME metingen. Als bij de SCIAMACHY reflectie metingen in de zuurstof A-band 0.86% van de continuümwaarde bij 756 nm wordt opgeteld, verdwijnt deze systematisch afwijking.

2. Door het combineren van de Gauss-Seidel en doubling methodes is een efficiënt model verkregen voor het berekenen van het stralingstransport, inclusief polarisatie, in een atmosfeer met wolken. Dit model is verder geoptimaliseerd voor simulaties van metingen in absorptiebanden door de reflecties en transmissies van de wolk te interpoleren over de absorptie en verstrooiings optische dikte in de wolk. Al met al levert dit een tijdwinst op van ongeveer 2 á 3 orders van grootte.

3. Onafhankelijke informatie over de wolkenfractie, wolken optische dikte en wolkentophoogte kan worden herleid door metingen van de zuurstof A-band en metingen in het UV tussen 350 nm en 390 nm te combineren.

4. Wanneer bij het afleiden van ozon profielen een effectieve grondreflectie wordt gebruikt om met wolken rekening te houden, levert dit een onderschatting op in de gemiddelde ozonconcentratie in de troposfeer tot ongeveer 70%. Door gebruik te maken van effectieve wolkenfracties en wolkentophoogtes onder de aanname van een wolken optische dikte van 40 wordt de gemiddelde ozonconcentratie in de troposfeer overschat met ongeveer 20%. Wanneer wolkeneigenschappen onafhankelijk worden bepaald met behulp van de methode ontwikkeld in dit proefschrift wordt het gemiddelde verschil tussen de ozonconcentratie in de troposfeer bepaald uit GOME metingen en die gemeten met behulp van ballonsondes gereduceerd tot minder dan 7% onder de meeste omstandigheden.